

Р. Ю. Барков*, Е. Ткачук, А. В. Поздняков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

**barkov@misis.ru*

МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВОГО СПЛАВА Al–Mg–Mn–Zr–Sc–Er

Исследованы микроструктура и механические свойства нового сплава Al–Mg–Mn–Zr–Sc–Er с пониженной концентрацией Sc. При добавлении Er с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского анализа было обнаружено образование фаз Al_3Er и (Al, Mg, Er), а также значительное модифицирование зерна. Эффект повышения твердости в 30 HV был получен после отжига при 370 °C в течение 4–10 часов. Максимальный уровень механических свойств был получен после прокатки с высокой долей холодной деформации.

Ключевые слова: металлы и сплавы, микроструктура, рентгеновские методы, механические свойства.

R. Yu. Barkov, E. Tkachuk, A. V. Pozdniakov

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NOVEL AL–MG–MN–ZR–SC–ER ALLOY

Microstructure and mechanical properties of novel Al–Mg–Mn–Zr–Sc–Er alloy with low Sc concentration were investigated. Significantly grain refinements, formation of Al_3Er and ternary (Al, Mg, Er) phases was found by scanning electron microscopy and X-ray analyze with Er addition. High hardening effect in 30 HV was obtained after annealing at 370 °C for 4–10 h. Maximum level of mechanical properties was found after rolling with high part of cold deformation.

Keywords: metals and alloys, microstructure, x-ray techniques, mechanical properties.

Из редкоземельных элементов скандий и цирконий обычно используются для улучшения механических свойств алюминиевых сплавов. Эффект упрочнения достигается путем образования наноразмерных дисперсоидов $Al_3(Zr, Sc)$ [1, 2]. В большинстве случаев Sc и Zr используются в качестве легирующих элементов в сплавах Al–Mg и повышают механические свойства за счет нерекристаллизованной структуры деформированного материала [1, 2]. Однако скандий является

самым дорогим легирующим элементом в алюминиевых сплавах. В последние годы Er приобретает интерес как легирующий элемент в алюминиевых сплавах [3, 4]. В [5] было показано, что Er увеличивает термическую стабильность дисперсоидов $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ после отжига при 370 °С. Другим способом улучшения механических свойств деформируемых алюминиевых сплавов является технология оптимизации деформации. Прочность может быть увеличена интенсивной пластической деформацией (ИПД) [6, 7]. Как было показано в [8, 9], прочность может быть значительно улучшена путем прокатки с большей долей холодной деформации.

Объектами исследования служили сплавы $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,25Sc-0,1Zr}$ и $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,12Sc-0,1Zr-0,38Er}$, полученные в печи сопротивления с применением чистых Al (99,99), Mg (99,90) и лигатур Al-10Mn, Al-3,5Zr, Al-2,5Sc и Al-1,8Er. Прокатку слитков проводили на лабораторном стане по двум технологиям. Технологии 1 – горячая прокатка при 360 °С от 20 до 4 мм и прокатка при комнатной температуре до 2 мм. Технология 2 – горячая прокатка при 360 °С от 28 до 14 мм и прокатка при комнатной температуре до 2 мм с одним промежуточным отжигом при 200 °С в течение часа. Микроструктуру и фазовый состав исследовали с помощью светового микроскопа Neophot-30, сканирующего электронного микроскопа *TESCAN VEGA 3LMH* и рентгеновского дифрактометра *Bruker D8 Advance*. Термическую обработку слитков и листов проводили в печи *Nabertherm*. Твердость измеряли с использованием оборудования для твердости по Виккерсу с нагрузкой 5 кг. Испытания на растяжение проводились с использованием испытательной машины *Zwick / Roell Z250 Allround*.

На рис. 1 показана структура зерен сплавов $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,25Sc-0,1Zr}$ и $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,12Sc-0,1Zr-0,38Er}$. При снижении концентрации Sc, Er значительно улучшает структуру зерна $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,25Sc-0,1Zr}$ с 290 до 90 мкм.

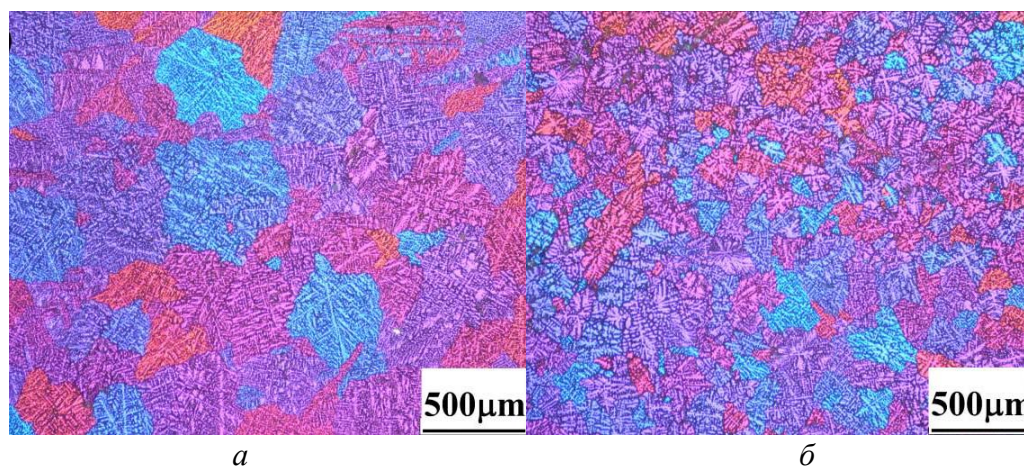


Рис. 1. Микроструктура сплавов $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,25Sc-0,1Zr}$ (а) и $\text{Al-5,7Mg-0,4Mn-0,12Sc-0,1Zr-0,38Er}$ (б)

На рис. 2 представлены микроструктура Al–5.7Mg–0.4Mn–0.12Sc–0.1Zr–0.38Er в литом состоянии, рентгеновская дифрактограмма и распределение химических элементов. Al, Al₃Mg₂, Al₃Er-фазы были идентифицированы с помощью РФА. Примерно семь пиков не могут быть идентифицированы с помощью рентгеновской базы данных, которые были отмечены «?» (рис. 2, а). Анализ распределение химических элементов показал, что светлые фазы на микроструктуре состоят из Al, Er и Mg.

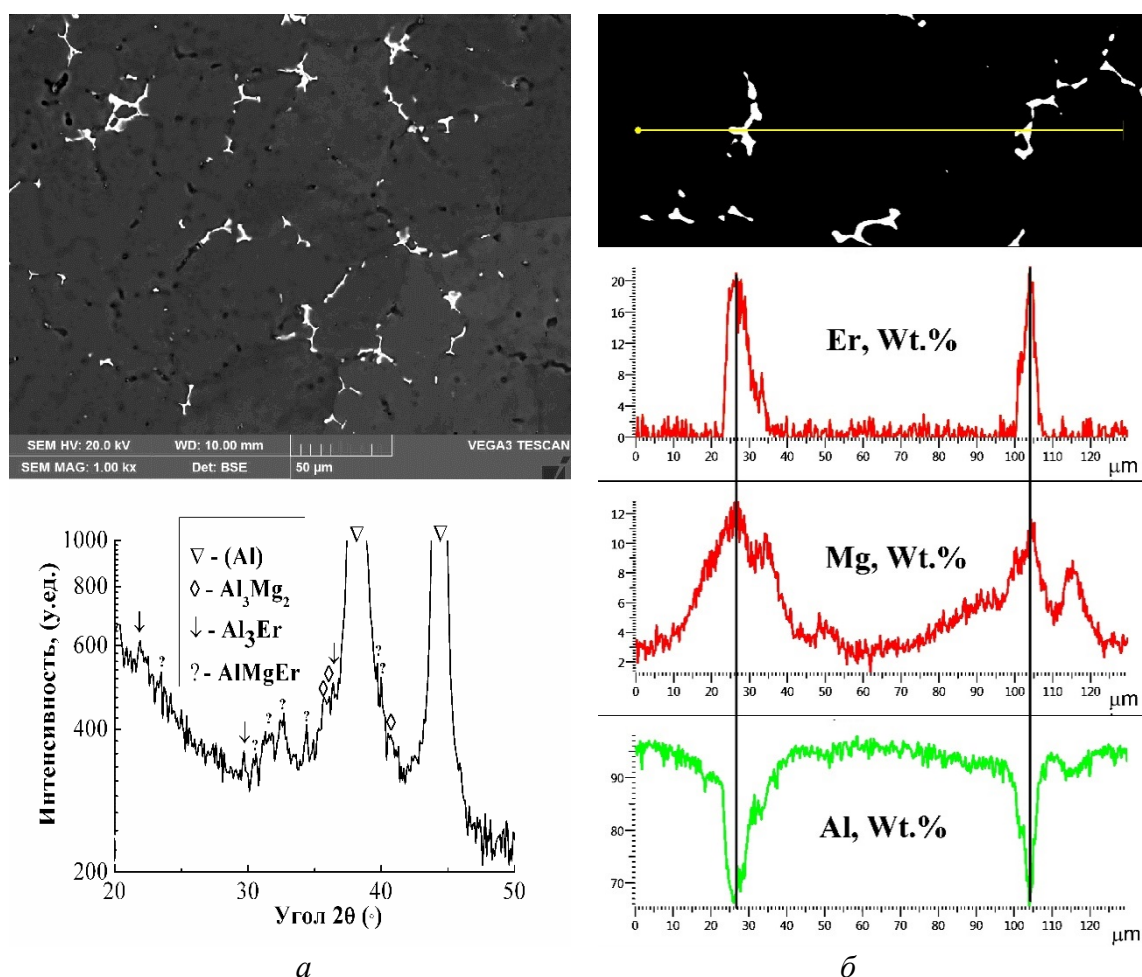


Рис. 2. Микроструктура и рентгеновская дифрактограмма (а), распределение химических элементов (б) в сплаве Al–5.7Mg–0.4Mn–0.12Sc–0.1Zr–0.38Er

В [10] было показано, что в системе Al–Mg–Er образуются несколько тройных фаз. По-видимому, не идентифицированные пики соответствуют тройной фазе (Al, Mg, Er).

Сплав Al–5.7Mg–0.4Mn–0.12Sc–0.1Zr–0.38Er имеет прочность ниже, чем сплав 1570 в том же состоянии (технология 1). С увеличением доли холодной деформации (ϵ_c) $\sigma_{0.2}$ нового сплава выше на 17–40 МПа в деформированном и отожженном состояниях (технология 2).

Таблица

Свойства сплавов 1570 и Al–5.7Mg–0.4Mn–0.12Sc–0.1Zr–0.38Er
в различных состояниях

Сплав	ϵ_c	ϵ_f	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
			Деформированное состояние			Отожженное (200 °С, 1 ч)		
1570 (Технология 1)	0.7	2.3	440	513	5.4	353	463	11.4
1570Er (Технология 1)	0.7	2.3	431	489	6.7	337	444	11.2
1570Er (Технология 2)	2.0	2.7	480	524	4.2	370	470	9.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Vladivoj O. Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al–Mg alloys / O. Vladivoj, S. Margarita // Mater. Charact. 2001. V. 47 P. 157–162.
2. Filatov Yu. A. New Al–Mg–Sc alloys/ Yu. A. Filatov, V. I. Yelagin, V. V. Zakharov // Mater. Sci. & Eng. A. 2000. V. 280. P. 97–101.
3. Booth-Morrison C. Coarsening resistance at 400°C of precipitation-strengthened Al–Zr–Sc–Er alloys / C. Booth-Morrison, D. C. Dunand, D. N. Seidman // Acta Mater. 2011. V. 59. P. 7029–7042.
4. Effects of homogenization on microstructures and properties of a new type Al–Mg–Mn–Zr–Ti–Er alloy / L. Z. He [et al.] // Mater. Sci. and Eng. A. 2010. V. 527. P. 7510–7518.
5. Effect of small additions Y, Sm, Gd, Hf and Er on the structure and hardness of the alloy Al-0.2% Zr-0.1% Sc / A. V. Pozdniakov [et al.] // Met. Sci. and Heat Treat. 2017. V. 58 (9–10). P. 537–542.
6. Valiev R. Z. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation / R. Z. Valiev, A. V. Korznikov, R. R. Mulyukov // Mater. Sci. Eng. A V. 1993. V. 168. P. 141–148.
7. Sabirov I. N. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development / I. N. Sabirov, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev // Mater. Sci. Eng. A. 2013. V. 560. P. 1–24.
8. Evolution of structure and mechanical properties of Al-4.7Mg-0.32Mn-0.21Sc-0.09Zr alloy sheets after accumulated deformation during rolling/ V. S. Zolotarevskiy [et al.] // The Phys. of Met. and Metall. 2016. V. 117 (11). P. 1163–1169.
9. Strength and substructure of the Al-4.7Mg-0.32Mn-0.21Sc-0.09Zr alloy sheets/ V. S. Zolotarevskiy [et al.] //, The Phys. of Met. and Metall. 2017. V. 118(2).
10. The Al–Er–Mg ternary system Part I: Experimental investigation / A. Saccone [et al.] // J. of Phase. Eq. 2002. V. 23 (1). P. 29–37.